

Введение

Запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) в октябре 1957 года дал старт к развитию нового вида связи — спутниковой связи. За прошедшие 70 лет системы спутниковой связи (ССС) прошли путь развития от единичных стационарных земных станций с крупногабаритными антеннами до миллионов малогабаритных абонентских устройств высокой мобильности.

Несмотря на бурное развитие оптоволоконных систем связи, интерес к спутниковым системам связи по-прежнему велик. Они предоставляют высокоскоростные каналы передачи данных, практически доступные в любой точке земного шара без необходимости прокладки вдоль трассы какого-либо кабеля. Развитие ССС идет по пути освоения новых диапазонов частот (Ka , Q/V), увеличения пропускной способности каналов при одновременном снижении излучаемой терминалами мощности [1] и повышении срока службы ретрансляторов. Решение этих задач в полной мере достигается только за счет использования пространственного ресурса — формирования узких лучей в обслуживаемых зонах земной поверхности («пятен»). Для этого в составе бортовых радиотехнических систем ИСЗ с целью существенного ограничения их массогабаритных показателей используются многолучевые гибридные зеркальные (ГЗА) или линзовые антенны [2–7]. Такие антенны, в том числе, служат основой для перспективных бортовых антенных решеток из крупноапертурных излучателей, обеспечивающих осесимметричное электрическое сканирование узким лучом в небольших (до 10 градусов) пределах [8–10].

Многолучевые зеркальные антенны (МЗА) представляют значительный интерес и при проектировании земных станций спутниковой связи. Непрерывная урбанизация приводит в ряде случаев к плотной застройке радиоцентров и невозможности дальнейшего увеличения площади антенного поля. Размещение рядом в условиях ограниченной площади множества однолучевых антенн, каждая из которых работает одновременно в нескольких диапазонах частот и обеспечивает связь только с одним ИСЗ, приводит к усложнению электромагнитной совместимости (ЭМС) средств связи. В этом случае использование МЗА позволяет улучшить ЭМС и одновременно сэкономить на площади размещения антенн. Кроме того, изготовление одной крупной МЗА зачастую обходится дешевле, чем изго-

товление десятков однолучевых зеркальных антенн большого диаметра.

Таким образом, разработка методов проектирования и расчета МЗА является актуальной как для бортовых ретрансляторов, так и для земных комплексов связи.

Проблема расчета и сооружения МЗА возникла еще задолго до запуска первого ИСЗ и, тем более, до появления первых систем спутниковой связи. Ранние работы по данной тематике [11, 12] относятся к началу 1950-х годов и посвящены созданию сканирующих антенн, предназначенных для использования в составе радиолокационных станций. Это же направление явилось первоначальным толчком к развитию МЗА, а уже в 1970-х годах появились первые работы [13–18], посвященные использованию антенн этого типа для СССР. Дальнейшее развитие МЗА было связано с развитием бифокальных антенн [19–35], борьбой с фазовыми ошибками за счет поворота облучателей, установки дополнительных зеркал либо линз [36–38]. Применение антенн со смещенной фокальной осью в качестве основы для построения МЗА [39–41, 44–47], а также реализация антенн, предназначенных для организации связи в сложных условиях (например, через ИСЗ, находящиеся на краю геостационарной орбиты) [42, 43], также способствовали развитию этого направления.

Существенный вклад в развитие теории и техники МЗА внесли Б.Е. Кинбер и его ученики [4, 22–27], Л.Д. Бахрах, Г.К. Галимов [7, 21, 48, 49], И.Ш. Базилая, В.П. Бандуков [165–167] В.А. Калашин, Е.В. Фролова [50–54], Б.Л. Коган, А.Н. Пластиков [55–58], М.В. Весник [40, 41, 116, 117], К.С. Kelleher [11, 12], С.М. Rappaport [31–35], С. Dragone [59, 60], Y. Mizuguchi [38, 61], N.C. Albertsen [62], T.S. Bird [63, 64], S.G. Naу [65–67]. Вклад в развитие ГЗА внесли Л.И. Пономарев, Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, А.А. Козлов [2, 5, 6, 8–10], А.С. Милосердов [68], С. Chandler, L. Hoey [3]. Кроме того, вопросы разработки многолучевых антенн нашли отражения в работах Д.И. Воскресенского [69], С.П. Скобелева [70], W.C. Cummings [71] и других. В создание и развитие методов анализа зеркальных антенн внесли вклад Г.З. Айзенберг, А.М. Модель [72], Б.Е. Кинбер [73, 111], В.А. Неганов и его ученики [74], Н.С. Архипов и его ученики [75], P.J. Wood [76], А.С. Ludwig [77] и другие. Большую работу по систематизации описания геометрии зеркальных антенн выполнили Ю.А. Ерухимович [78–83] и С. Granet [84–90].

Классификация существующих и перспективных МЗА приведена на рис. В.1. Такие антенны могут быть условно разделены на три группы: МЗА, построенные на основе однолучевых антенн (прежде всего, это ГЗА), антенны на основе параболического тора и антенны, полученные путем синтеза или модификации поверхностей.



Рис. В.2. Классификация методов анализа зеркальных антенн

Синтез и модификация зеркальных поверхностей возможны только в антеннах с двумя и более зеркалами.

Методы анализа зеркальных антенн (рис. В.2) условно могут быть разделены на две группы: методы расчета геометрии отражателей зеркальных антенн, в том числе определения места положения облучателей, и методы расчета характеристик антенн. Первая группа методов используется при проектировании антенны: выборе или синтезе поверхностей зеркал, определении значений геометрических

параметров и взаимного положения облучателей и отражателей. Методы второй группы применяются, когда параметры конструкции уже известны.

Основными методами расчета характеристик зеркальных антенн являются метод геометрической оптики, основанные на принципе Гюйгенса–Кирхгофа апертурный и токовый методы, а также наиболее строгий и точный метод интегральных уравнений. Для уточнения результатов расчета дальнего бокового излучения и частичного учета взаимного влияния элементов антенны используются методы геометрической и физической теории дифракции, а также учет затенения (экранирования) рабочей поверхности зеркала его кромкой.

В качестве отдельной категории следует выделять методы расчета шумовой температуры зеркальных антенн. Во-первых, данная характеристика представляет особенный интерес именно для ССС, поскольку из-за большого затухания (более 200 дБ в Ку-диапазоне при связи с ИСЗ на геостационарной орбите) мощность полезного сигнала в точке приема оказывается сопоставима с мощностью внешних и внутренних шумов (помех). Во-вторых, для расчета шумовой температуры антенны должны быть известны все ее остальные характеристики: диаграмма направленности, коэффициент усиления и другие. И в-третьих, методы расчёта позволяют оценить выигрыш в шумовой температуре, получаемый различными техническими приёмами усовершенствования конструкции антенны.

Несмотря на большое число публикаций, систематизированное описание геометрии и расчёта параметров различных модификаций многозеркальных антенн фактически отсутствует. Методы анализа зеркальных антенн достаточно полно описаны в работах [49, 76]. Однако с момента выхода данных публикаций появились некоторые новые методы, а ряд известных из них к этому времени были усовершенствованы. Предлагаемая монография представляет собой попытку восполнить данные пробелы.

Первая глава монографии посвящена методам расчета характеристик зеркальных антенн. Для полноты в ней приведено описание как новых, так и известных методов анализа.

Во второй главе содержится описание моделей облучателей зеркальных антенн. В этой главе впервые в обобщенном векторном виде представлены формализованные и инвариантные к выбору системы координат полные диаграммы направленности наиболее часто используемых облучателей в виде конического рупора и открытого конца волновода, а также абстрактного облучателя в виде гауссова пучка. С помощью данных моделей задается первичное возбуждение зеркальной антенны.



Рис. В.1. Классификация многолучевых зеркальных антенн

В основе первой и второй групп антенн лежат поверхности, полученные вращением определенного профиля: в первом случае ось вращения параллельна фокальной оси параболы, во втором — составляет с ней угол, близкий к 90° . Антенны первого и второго типов могут быть одно-, двух- и многозеркальными, симметричными или офсетными. При этом третьи и последующие зеркала в таких антеннах либо устанавливаются с целью коррекции фазовых ошибок отдельных лучей, либо играют роль лучеводов.

К антеннам с синтезированной поверхностью относятся, прежде всего, бифокальные и полифокальные антенны. Для применения в составе радиотехнических устройств систем связи, в отличие от систем радиолокации, такие антенны выполняются только по офсетной схеме (их контррефлектор имеет большие размеры и в симметричных антеннах существенно затеняет рефлектор, а устранить затенение за счет изменения поляризации в системах связи не представляется возможным). Основу антенн с модифицированной формой поверхности составляют антенны с осесимметричными рефлекторами.

Третья и четвертая главы посвящены систематизированному описанию геометрических особенностей отражателей зеркальных антенн. В третьей главе рассматриваются однолучевые зеркальные антенны, являющиеся основой для построения ГЗА, в четвертой главе — многолучевые зеркальные антенны на основе параболического тора, а также бифокальные и полифокальные антенны. Для антенны каждого из типов приведены математические уравнения, описывающие форму рабочей поверхности рефлектора и контррефлектора в различных системах координат. Также определены векторы нормалей и касательных, необходимые для дальнейшего расчета характеристик, установлена взаимосвязь различных геометрических параметров и определен минимально необходимый набор независимых параметров, определяющих конструкцию антенны. Геометрия всех конструктивных особенностей антенн описана в едином ключе, в одних и тех же системах координат. В качестве независимых параметров при описании конструкции рефлекторов выбираются два угловых параметра, что в ряде случаев позволяет упростить расчётные формулы. Полученные в этих главах математические выражения могут быть непосредственно использованы при расчете характеристик методами, изложенными в первой главе.

Пятая глава посвящена выбору геометрических параметров МЗА и модификации формы рабочей поверхности рефлекторов с целью повышения эффективности антенн. Данные вопросы излагаются в самом конце монографии, поскольку их основой служат результаты, приведенные в первых четырех главах.